

Обзорная статья / Review

DOI 10.15826/urej.2020.4.2.004

УДК 528.852

Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы

А. В. Сосновский

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ sav83@e1.ru

Аннотация

Представлена ретроспектива и обзор современного состояния технологий интерферометрической обработки радиолокационных данных, получаемых космическими радиоэлектронными системами дистанционного зондирования Земли, в задачах построения цифровых моделей рельефа. Рассмотрены вопросы моделирования интерферометрической обработки радиолокационных данных и практических способов ее реализации, а также ошибок способы оценивания точности восстановления абсолютной фазы и рельефа местности.

Ключевые слова

интерферометрическая обработка данных РСА, подавление фазового шума, развертывание фазы, анализ точности

Для цитирования

Сосновский А. В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.

InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues

A. V. Sosnovsky

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ sav83@e1.ru

Abstract

The paper presents a retrospective review and current state-of-art of radar data interferometric processing techniques (InSAR) in space-based radio-electronic systems of the remote sensing of the Earth in the tasks

of digital elevation models (DEM) constructing. History of InSAR systems development and trends in the development of data processing methods are considered. It is shown, that InSAR systems take their origin from radio astronomic tasks, related to the Moon and planets' surface investigations, carried out by the USA and the USSR in 1960th. Since 1980th the InSAR techniques are widely used for the Earth remote sensing tasks (digital elevation models creation, surface displacements detection, recognition of vegetation features, etc.), but the problems of absolute phase restoration inhibit the wide utilization of such systems in the Earth monitoring and mapping tasks, because the accuracy of digital elevation models obtained by such systems remains disputable.

The mathematical model and principles of interferometric processing of data from satellite synthetic aperture radar are reviewed in conjunction with problems of absolute phase restoration errors measurement. We demonstrate, that despite the existing diversity of interferometric algorithms (i.e. phase noise filtration algorithms, phase unwrapping algorithms), the existing ways of accuracy assessment of the obtained result implies an end-to-end DEM validation, which complicates the comparative study of InSAR processing algorithms efficiency analysis. So, the author's proposals for such analysis, based on reference DEM backward geocoding and error functions analysis, are reviewed. This approach allows identifying optimal values and combinations of parameters for interferometric algorithms at each processing stage, and it is applicable for remote sensing radar data obtained by different radar systems in different imaging modes.

Keywords

InSAR data processing, phase noise filtration, phase unwrapping, accuracy analysis

For citation

Sosnovsky A. V. InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.

Введение

Одной из основных тенденций развития современных радиолокационных систем космического наблюдения наряду с реализацией режимов сверхвысокого пространственного разрешения и съемки в полном поляризационном базисе стало широкое применение интерферометрической обработки съемочных данных (технологии InSAR и DInSAR) для получения информации о рельефе местности и его изменениях. Суть метода космической радиолокационной интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо одной антенной на двух витках орбиты. Он сочетает высокую точность фазового метода измерения дальности

с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА).

Цифровые модели рельефа и карты смещений рельефа широко используются при создании и обновлении высотной основы цифровых топографических карт различных масштабов, при экологическом мониторинге зон проведения работ по добыче полезных ископаемых, контроле состояния транспортных коммуникаций. Интерферометрические режимы радиолокационной съемки позволяют получать извлекать информацию о рельефе местности (высоты и смещения) в почти автоматическом режиме обработки данных, что делает ее очень привлекательной для использования в данных задачах. Широкое применение при решении различных задач космического мониторинга земной поверхности находит цифровая модель рельефа SRTM с периодом пространственной дискретизации в 30–90 м, построенная с использованием интерферометрической съемки радиолокатором с жесткой базой SIR-C в 2000 г. Дальнейшее развитие спутниковых радиолокационных космических систем высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (аппараты TerraSAR-X, COSMOSkyMed, ALOS PALSAR, SARlupe, YaoGan, Sentinel-1, Кондор-Э) позволило расширить область применения интерферометрической съемки в задачах мониторинга смещений рельефа земной поверхности, особенно в районах интенсивного строительства и районах проведения работ по добыче полезных ископаемых.

Вместе с тем, поскольку на каждом этапе интерферометрической обработки используются многочисленные эмпирические алгоритмы и методы, важной остается задача выбора наиболее эффективных алгоритмов с точки зрения конечного результата. Открытыми остаются также вопросы получения экспериментальных оценок точности формируемых цифровых моделей рельефа при использовании различных алгоритмов интерферометрической обработки. Таким образом, целью настоящей статьи является обзор современного состояния области интерферометрической обработки космических радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, а также методов и подходов к оцениванию точности цифровых моделей рельефа, получаемых такими системами.

История и тенденции развития космических интерферометрических систем радиолокационного зондирования Земли

История применения радиолокационных методов исследования Земли и космического пространства берет начало в середи-

не 1940-х гг., когда Райл (впоследствии удостоенный нобелевской премии) и Ванберг впервые применили двухэлементный радиоинтерферометр с изменяемой базой (при несущей частоте $f_0 = 175$ МГц) для исследования открытого в 1930-х гг. космического радиоизлучения [1]. В 1950-х – 1960-х гг. радиоинтерферометрические методы были успешно применены для исследований (в том числе – для построения рельефов) Луны и ближайших планет Солнечной системы [2–7].

С развитием в 1960-х гг. технологии радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами [8], позволившей получать интерференционные картины, используя только один приемник, радиолокационные методы стали востребованными не только в астрономических исследованиях, но и в задачах исследования земной поверхности. Один из первых экспериментов по получению радиоинтерференционных портретов земной поверхности был произведен Л. Грэхэмом в начале 1970-х гг. [9]. Во второй половине 1980-х гг. Р. Голдштейном из НАСА и др. были проведены эксперименты по интерферометрической съемке и обработке радиолокационных данных космических PCA SIR-B [10] и SEASAT-A [11], а также PCA авиационного (NASA CV990) базирования [12]. По результатам первых двух экспериментов была показана возможность получения устойчивой интерференционной картины Земли при отсутствии жесткой интерферометрической базы (PCA-интерферометрия с повторным проходом, repeat-track InSAR), а количественный анализ результатов последнего эксперимента показал, что получаемые таким способом цифровые модели рельефа (ЦМР) имеют среднеквадратическую ошибку по высоте от 2 до 10 м, что, в свою очередь, продемонстрировало большой потенциал PCA-интерферометрии (InSAR) для решения задач дистанционного зондирования Земли. Тогда же были высказаны идеи и проведены эксперименты по возможности применения радиолокационной интерферометрической съемки с продольной базой для наблюдения за океаническими течениями [13–14] – AT-InSAR и радиолокационной интерферометрической съемки с повторным проходом для обнаружения малых изменений рельефа [15] – дифференциальной интерферометрии (DInSAR).

Первые успешные результаты выявили и основные проблемы в получении и обработке радиолокационной информации в интерферометрических системах дистанционного зондирования Земли:

- неоднозначность фазовых измерений и, как следствие, необходимость выполнения развертывания фазы при интерферометрической обработке [16];

– пространственная и временная декорреляция радиолокационных эхо-сигналов, приводящая к необходимости подавления фазового шума и отбраковке участков радиоинтерференционных портретов [17];

– специфические геометрические искажения – сдвигка (foreshortening) и наложение (layover), характерные для равнодальностной проекции и требующие применения специальных методов геопривязки [18–20].

В 1990-х гг. развитие техники и технологий космической PCA-интерферометрии выразилось в:

1) появлении первой tandemной съемочной системы – аппаратов ERS-1 и ERS-2, позволившей сократить период между повторными съемками, уменьшая временную декорреляцию сигналов;

2) развитии вычислительных методов интерферометрической обработки, направленных на решение указанных выше проблем;

3) подготовке космической миссии по созданию первой глобальной цифровой модели рельефа, построенной по данным PCA-интерферометрии – SRTM (Shuttle Radar Topography Mission [21]).

Данная миссия состоялась в феврале 2000 г. и заключалась в проведении интерферометрической съемки поверхности Земли (в пределах от 60° с. ш. до 56° ю. ш.) радиолокатором SIR-C/X-SAR, установленном на шаттле Endeavour и снабженным дополнительным приемником, расположенном на конце прикрепленной 61-метровой штанги (реализуя, таким образом, интерферометр с жесткой базой) [22]. Полученная одноименная ЦМР была опубликована в 2005 г. Она имеет период пространственной дискретизации 90 м (для территории США – 30 м) и вертикальную точность 5–16 м в зависимости от континента и выраженности рельефа [23]. Она широко используется при решении научных и производственных задач геодезии, картографии, геологии, а также в различных информационных сервисах. Таким образом, космическая PCA-интерферометрия позволила получить вполне самостоятельные метрически корректные данные с высоким потенциалом научного, технического и коммерческого использования.

В 2000-х гг. PCA-интерферометрия перестала быть исключительно научной областью и приобрела коммерческую составляющую. С появлением специализированных проприетарных программных комплексов SARSCAPE, Imagine IFSAR DEM, PHOTOMOD RADAR и с учетом открытого опубликования данных SRTM стало возможным говорить о появлении информационной технологии космической радиолокационной интерферометрии. Также 2000-е гг. отмечены появлением радиолокационной (в том числе интерферометрической) космической

съемки сверхвысокого разрешения (TerraSAR-X, CosmoSkyMed, RADARSAT-2), развитием и внедрением метода постоянных отражателей для дифференциальной интерферометрической съемки, нашедшим широкое применение при мониторинге работ на месторождениях по добыче полезных ископаемых и состояния транспортных сетей [24–27]. Также широкое применение нашли данные, получаемые радиолокатором PALSAR аппарата ALOS-1, которые благодаря использованию зондирующего сигнала L -диапазона оказались менее подвержены пространственной и временной декорреляции.

Наконец, 2010-е гг. отмечены укреплением ранее наметившихся разнонаправленных тенденций по коммерциализации результатов съемки сверхвысокого разрешения, с одной стороны, и появлением новых сервисов свободного доступа к результатам съемки среднего разрешения – с другой. Так, новая глобальная ЦМР WorldDEM (2014 г.) с пространственным разрешением 12 м и вертикальной точностью в 4 м, полученная по результатам работы тандема TerraSAR-X/TanDEM-X, доступна исключительно на коммерческой основе; а результаты съемки КА Европейского космического агентства Sentinel-1A/1B (2014 и 2016 гг.), напротив, распространяются свободно, также свободно распространяется и новый программный комплекс для интерферометрической обработки Sentinel Application Platform (SNAP) [28].

Исходя из анализа публикационной активности, а также из исторически сложившихся предпосылок, можно выделить следующие тенденции развития современных космических технологий РСА-интерферометрии:

- совершенствование методов и алгоритмов интерферометрической обработки, направленное на повышение точности результатов и снижение вычислительных издержек;
- увеличение пространственного разрешения съемочных систем и освоение различных частотных диапазонов;
- расширение географии операторов съемки: если в 1990-х гг. данная тематика разрабатывалась в основном НАСА и Европейским космическим агентством (ЕКА), то в 2000–2010 гг. к разработкам подключились научные и производственные центры России, Китая, Японии и др.
- соединение различных радиолокационных методов: поляризационная (POLInSAR [29–30]), инверсная (InISAR [31]), многочастотная (multi-frequency) и многобазовая (multi-base, [32]) интерферометрические технологии и др.;
- одновременная радиолокационная съемка в различных поляризациях излучаемой и регистрируемой волн (съемка в полном поляризационном базисе);

– широкое распространение методов дифференциальной интерферометрической съемки, особенно – метода постоянных отражателей [33];

Основными научными центрами и организациями, проводящими исследования в области космической РСА-интерферометрии и имеющими опыт разработки радиолокационной съемочной аппаратуры, являются: НАСА (лаборатория реактивного движения – JPL), Европейское космическое агентство (ESA), в том числе Германский центр авиации и космонавтики (DLR) и Итальянское космическое агентство (ASI), Канадское космическое агентство (CSA), Японское космическое агентство (JAXA), концерн радиостроения «Вега» (Россия), Китайская аэрокосмическая научно-техническая корпорация (CASC). В России и бывшем СССР наиболее известны работы в области интерферометрической обработки радиолокационной информации, выполнявшиеся А. И. Захаровым [34–35], В. О. Михайловым [36], Л. Б. Неронским [37], И. В. Елизаветиным и А. В. Ксенофоновым [38], Р. И. Шуваловым [39], А. В. Филатовым [26; 40], М. И. Бабокиным [41–42], А. И. Баскаковым [43], А. В. Ксендзуком [44] и др.

Принципы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой

Суть метода космической РСА-интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных при зондировании одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо одной антенной на двух витках орбиты носителя. Приблизительно процесс формирования интерференционного сигнала (интерферограммы) в РСА можно описать следующим образом. Амплитуды и фазы регистрируемых при съемке сигналов записываются в радиоголограмму, а после синтеза апертуры – в комплексные радиолокационное изображение (КРЛИ) [37; 45]. Фазы элементов КРЛИ являются случайными величинами, содержащей детерминированную составляющую, связанную с рельефом облучаемой поверхности, и составляющие, связанные со случайными изменениями при отражении от поверхности и прохождении волны через атмосферу, с набегами в узлах приемопередающей аппаратуры и искажениями при синтезе. При интерферометрической обработке случайные составляющие фаз частично компенсируют друг друга, что позволяет в явном виде выделить топографическую составляющую, которая зависит от длины волны зондирующего радиосигнала и разностного расстояния от фазовых центров антенн (ФЦА) до элемента поверхности (рис. 1).

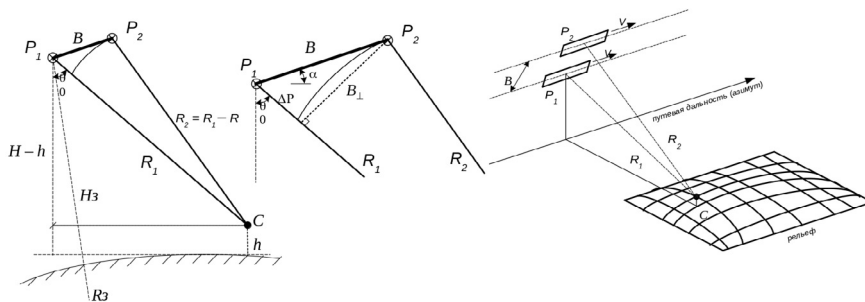


Рис. 1. Геометрия радиолокационной интерферометрической съемки: P_1 и P_2 – положения носителя РСА (центры синтезированных апертур) при наблюдениях элемента поверхности C , R_1 и R_2 – наклонные дальности, B и B_\perp – интерферометрическая база и ее нормальная составляющая, θ_0 – угол бокового обзора, H_3 и H – высота орбиты носителя над поверхностью Земли и высота, приведенная к геометрии «плоской Земли» при первом наблюдении

Fig. 1. The InSAR imaging geometry: P_1 and P_2 are the positions of the SAR carrier (the centers of synthesized apertures) when observing the surface element C , R_1 and R_2 are the ranges, B and B_\perp are the interferometric and normal baseline, θ_0 is the side-looking angle, H_3 and H are the height of the carrier's orbit above the earth's surface and the same height reduced to the "flat Earth" geometry (for the first image)

Вопросы моделирования радиолокационной интерферометрической съемки подробно рассматривались Родригезом и Мартином [46], Бамлером и Хартлом [18], Ханссеном [47]. Наиболее полно модель интерференционного сигнала описана Бамлером и Хартлом с использованием системы координат «нулевого доплеровского сдвига», и именно этот подход чаще других используется в прикладном программном обеспечении обработки данных РСА. В предложенном ими подходе модель комплексного РЛИ $\dot{Z}(x, \eta)$ в косоугольной системе непрерывных координат «азимут – наклонная дальность» в рамках геометрии «плоской Земли» записывается в следующем виде:

$$\dot{Z}(x, \eta) = \exp(-j4\pi/\lambda R_0) \cdot \left(\int a(\vec{r}) d\zeta \times \exp(-j4\pi/\lambda \eta) \right) \otimes h(x, \eta), \quad (1)$$

где R_0 и η – минимальная (на траверзе) и текущая наклонные дальности; (η, ζ) – система координат, полученная вращением координат (y, z) (наземная дальность – высота) на угол в плоскости yOz вокруг оси x ; $a(\vec{r})$ – плотность отражателей в элементарном объеме пространства; $h(x, \eta)$ – функция рассеяния точки (отклик РСА на точечную цель), \otimes – двумерная свертка.

Интерферометрическая обработка предполагает получение и пространственное совмещение двух таких изображений: $\dot{Z}_1(x, \eta) = |\dot{Z}_1(x, \eta)| \cdot \exp(j\phi_1(x, \eta))$ и $\dot{Z}_2(x, \eta) = |\dot{Z}_2(x, \eta)| \cdot \exp(j\phi_2(x, \eta))$, разностная фаза которых

$$\Delta\varphi(x, \eta) = \arg\{\dot{Z}_1(x, \eta) \cdot \bar{Z}_2(x, \eta)\} \quad (2)$$

образует интерферограмму $\Delta\varphi(x, \eta)$. Отдельный элемент местности регистрируется на комплексных РЛИ в позициях с координатами $\dot{Z}_1(x, \eta)$ и $\dot{Z}_2(x, \eta)$ с топографическими составляющими фаз

$$\varphi_1(x, R_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \varphi_{s1};$$

$$\varphi_2(x, R_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{s2},$$

где φ_{s1} и φ_{s2} – составляющие фазы, соответствующие перемещению самого элемента местности (если оно присутствует). При неподвижности элемента, стабильности среды распространения и в отсутствии флуктуаций разностная фаза (с учетом совмещения РЛИ) будет определяться следующим образом:

$$\Delta\varphi(x, R_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R, \quad (3)$$

где $\Delta R = R_1 - R_2$. В [18] не указана явным образом связь между высотой отражающего объекта h относительно опорной поверхности (например, референц-эллипсоида или плоскости Земли) и формируемой им разностной фазой $\Delta\varphi(x, R_1)$, эта связь в разных вариантах приводится в [48]:

$$h(x, R_1) = H - R_1 \times (\cos\alpha \cdot \sqrt{1 - \Theta^2} - \sin\alpha \cdot \Theta);$$

$$\Theta = \frac{B^2 - \Delta R^2 + 2R_1 \Delta R}{2BR_1}, \quad (4)$$

где H – высота орбиты носителя РСА, B , α – база интерферометра и угол ее уклона (относительно «плоской Земли»). В (геометрии земного эллипсоида) соотношение будет выглядеть схожим, но более сложным образом [48], при этом можно привести его к виду (4) путем замены высот H и $h(x, R_1)$ и углов α на значения, исчисляемые относительно плоскости, касательной к земному эллипсоиду в точке расположения цели [46].

Во всех эксплуатируемых в настоящее время РСА используется формирование сигналов в цифровой форме, соответственно для записи интерференционного сигнала (интерферограммы) предпочтительнее использовать дискретные аргументы:

$$\Delta\varphi(x, R_1) \rightarrow \Delta\varphi_{m, n}. \quad (5)$$

Интерферограмма $\Delta\varphi_{m, n}$ представляет собой двумерный сигнал (рис. 2), основным элементом которого являются интерференционные полосы – фринги, границы которых соответствуют набегам разностей фаз на величину 2π (что соответствует

изменению разностного расстояния на величину $4\pi\Delta R/\lambda$) и зависят от геометрических характеристик системы и рельефа местности.

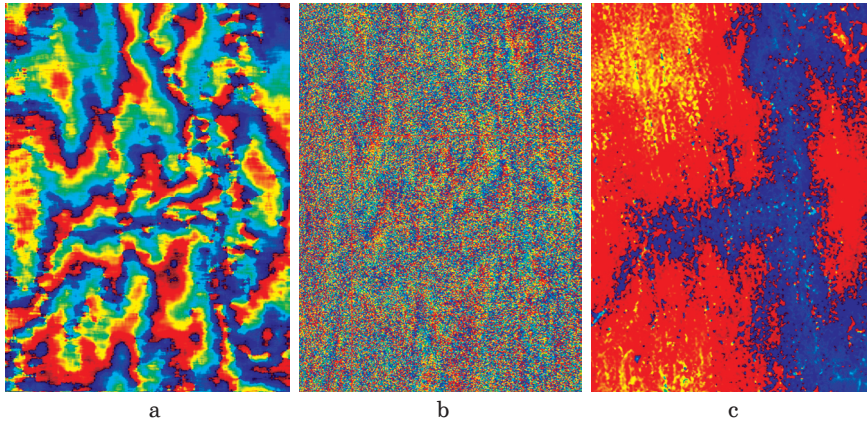


Рис. 2. Интерферограммы PCA ALOS PALSAR участка земной поверхности при различных режимах съемки: а) ГГ-поляризация, $B_{\perp} = 3500$ м; б) ГВ-поляризация, $B_{\perp} = 3500$ м; в) ГГ-поляризация, $B_{\perp} = 500$ м

Fig. 2. ALOS PALSAR interferograms of the earth's surface at various imaging modes: а) HH-polarization, $B_{\perp} = 3500$ m; б) HV-polarization, $B_{\perp} = 3500$ m; в) HH-polarization, $B_{\perp} = 500$ m

Неполная компенсация случайных составляющих фаз сигналов проявляется на интерферограмме в виде фазового шума. Числовой характеристикой, часто используемой в PCA-интерферометрии для оценки соотношения полезного сигнала и фазового шума, является коэффициент когерентности $\rho_{m,n}$, характеризующий качество участка интерферограммы и его пригодность для дальнейшего преобразования в цифровую модель рельефа или карту изменений рельефа. Оценка интерферометрической когерентности производится в локальных окнах пары радиолокационных изображений и вычисляется как коэффициент корреляции между соответствующими комплексными отсчетами этих изображений по формуле:

$$\hat{\rho}_{m,n} = \frac{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} \dot{Z}_{1m,n} \bar{\dot{Z}}_{2m,n}}{\sqrt{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{1m,n}|^2 \times \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{2m,n}|^2}}, \quad (6)$$

где M_0, N_0 – полуразмеры окна оценивания. Чем больше $|\hat{\rho}_{m,n}|$, тем, как правило, сильнее топографическая составляющая фазы преобладает над случайной.

Плотность распределения фазового шума при отсутствии фильтрации и некогерентного накопления отсчетов описывается выражением:

$$p_{\varphi} = \frac{1-\rho^2}{2\pi} \frac{1}{1-\rho^2 \cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)} \times \left(1 + \frac{\rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0) \arccos(-\rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0))}{\sqrt{1-\rho^2 \cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)}} \right), \quad (7)$$

где $\Delta\varphi_0$ – математическое ожидание фазы, соответствующее, как правило, разностной топографической фазе. Выражение (7) соответствует плотности распределения случайной величины $(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)$ на интервале $[-\pi, \pi)$, имеющей гауссово-подобную форму при средних больших ρ и вырождающейся в равномерную при малых ρ [18]). Для получения как можно более устойчивого интерференционного сигнала съемки проводятся с минимально возможным интервалом и/или в одинаковый сезон года при сходных погодных условиях.

Целями дальнейшей интерферометрической обработки является восстановление абсолютной (развернутой) фазы интерференционного сигнала и извлечение из него полезной картографо-геодезической информации – цифровой модели поверхности Земли или карты смещений элементов поверхности. Этапы интерферометрической обработки включают компенсацию фазового уклона, выполнение межэлементного некогерентного накопления, подавление фазового шума (сглаживании интерферограммы) и развертывание интерферометрической фазы.

Компенсация фазового уклона (выравнивание интерферограммы – «interferogram flattening») заключается в устранении априорно известной информации о поведении фазы, устраняя, в первую очередь, линейный поперечный набег фазы, связанный с геометрией бокового обзора, что позволяет сократить число интерференционных полос и упростить реализацию последующих этапов обработки. Для компенсации может использоваться синтетическая опорная фаза (корректирующее фазовое поле) $\Phi_{m,n}^C$, рассчитанная исходя из параметров траектории носителя и геометрии опорной поверхности (общеземного либо референц-эллипсоида, а также привязанным к ним низкодетальным ЦМР); также используется и адаптивная компенсация уклона на основе характеристик самой интерферограммы (частот интерференционных полос). Компенсация осуществляется следующим образом:

$$\Delta\varphi_{m,n}^C = \arg\{\exp[j(\Delta\varphi_{m,n} - \Phi_{m,n}^C)]\}. \quad (8)$$

При выравнивании происходит перенос спектра интерферограммы в область низких частот, что позволяет трактовать ее как демодуляцию пространственной частоты интерференционного сигнала. Одновременно с этим изменяется и характер интерференционных полос: если до выравнивания они следуют через интервал, равный высоте неоднозначности h_A , и в направлении, взятом вдоль линии визирования РСА, то после выравнивания полосы они следуют с тем же интервалом, но в направлении нормали к поверхности, использованной для построения синтетической опорной фазы. Учитывая характер преобразования спектра при выравнивании, представляется ошибочным выполнение некогерентного накопления перед выравниванием, как это реализовано в программных пакетах SARscape и PHOTOMOD RADAR: несмотря на небольшую экономию вычислительных ресурсов, повреждения сигнала, связанные с искажением спектра, еще не смещенного в область низких частот, при понижении частоты дискретизации, усложняют процесс развертывания фазы и отрицательным образом сказываются на точности получаемого результата.

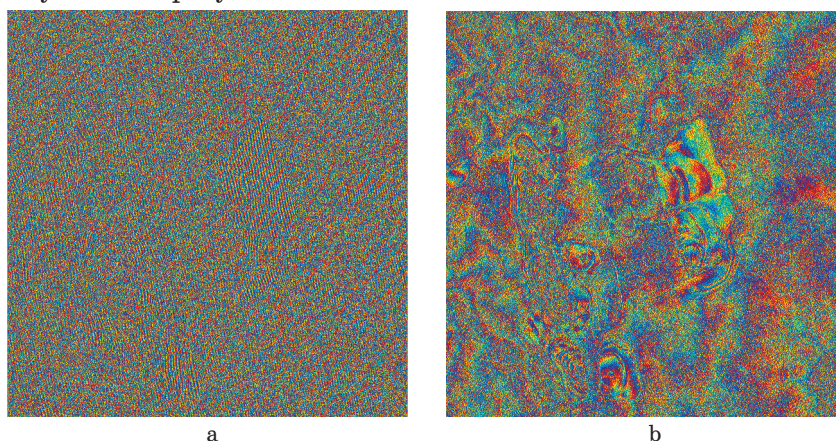


Рис. 3. Выравнивание интерферограмм: а) исходная интерферограмма; б) интерферограмма после выравнивания

Fig. 3. Interferograms flattening:
а) raw interferogram; б) flattened interferogram

Межэлементное некогерентное накопление (НкН) интерференционного сигнала заключается в суммировании его соседних отсчетов с равными (либо неравными, но действительными) весами, что точки зрения теории цифровой обработки сигналов и изображений представляет собой компрессию (прореживание) частоты дискретизации с предварительной фильтрацией, как правило, усредняющим фильтром. Некогерентное накопление позволя-

ет снизить уровень флуктуаций интерферометрической фазы при одновременном ухудшении разрешающей способности данных. Кроме того, некогерентное накопление позволяет согласовать пространственные разрешения интерферограммы по азимуту и наклонной дальности, а также ускорить выполнение последующих этапов интерферометрической обработки. Влияние некогерентного накопления на плотность распределения фазы p_φ подробно рассматривается в [18] и описывается (с точки зрения плотности распределения интерферометрической фазы) следующим образом:

$$p_\varphi = \frac{\Gamma\left(L + \frac{1}{2}\right)(1-\rho^2)^L \rho \cos(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)\left(L + \frac{1}{2}\right)(1-\rho^2)\cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)} + \frac{(1-\rho^2)^L}{2\sqrt{\pi}} {}_2F_1\left(L, 1, \frac{1}{2}; \rho^2 \cos^2(\Delta\varphi - \Delta\varphi_0)\right), \quad (9)$$

где ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot)$ – гипергеометрическая функция, L – количество накапливаемых элементов КРЛИ.

Подавление фазового шума является критически важным этапом интерферометрической обработки, поскольку вне зависимости от условий съемки исходный уровень фазового шума делает невозможным дальнейшее восстановление абсолютной фазы, его результатом является сглаженная интерферограмма $\Delta\varphi_{m,n}^F$. Подавление фазового шума интерферограммы осуществляется, как правило, двумерными линейными либо адаптивными фильтрами:

$$\Delta\varphi_{m,n}^F = F\{\Delta\varphi_{m,n}^C\}, \quad (10)$$

где $F\{\cdot\}$ – оператор, реализуемый фильтром (линейный или нелинейный). Наибольшее распространение среди методов фильтрации получил фильтр Голдштейна [49–50], вычисляющий двумерный БПФ-спектр $F_\varphi(k, l)$ блока интерферограммы, который затем взвешивается следующим образом:

$$G_\varphi(k, l) = |F_\varphi(k, l)|^{1-\hat{\rho}} \cdot F_\varphi(k, l), \quad (11)$$

где $G_\varphi(k, l)$ – двумерный спектр обрабатываемого блока интерферограммы, из которого обратным двумерным БПФ восстанавливается блок сглаженной интерферограммы. Фильтр работает в перекрывающихся блоках, после обработки (11) смежные блоки сшиваются с помощью взвешивающей функции треугольного вида.

При подавлении фазового шума формируется новая – сглаженная интерферограмма $\Delta\varphi_{m,n}^F$, которая далее преобразуется в абсолютную фазу путем развертывания:

$$\Psi_{m,n} = \Delta\varphi_{m,n}^F + 2\pi k_{m,n}, \quad (12)$$

где $k_{m,n} \in Z$ – априорно неизвестные целочисленные значения. Развертывание сглаженной интерферограммы также является критически важным этапом интерферометрической обработки в задаче получения цифровых моделей поверхности, поскольку используемые при выполнении этой задачи геометрические параметры (длина нормальной составляющей базы, длина волны РСА) крайне редко позволяют получить однозначную относительную фазу. Его реализация осложняется наличием на интерферограмме остаточных фазовых шумов и неоднозначностей (разрывов), что делает решение неоднозначным, сложным теоретически и емким вычислительно. Для развертывания фазы существует несколько десятков алгоритмов [39; 48; 51], основанных на аппарате из различных областей современной математики: от теории векторных полей (метод Голдштейна, метод функций Грина) и теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод оптимизации сетевых потоков) до теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, нелинейная стохастическая фильтрация и др.) и генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п.

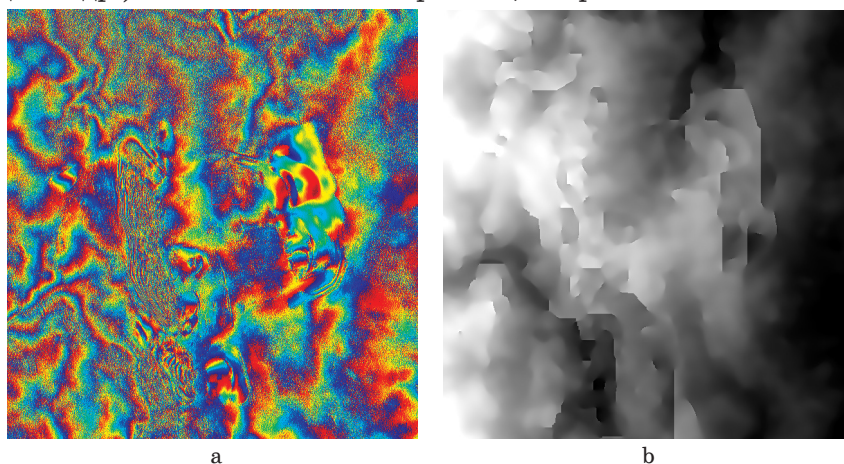


Рис. 4. Подавление фазового шума и развертывание интерферограммы: а) сглаженная интерферограмма; б) развернутая интерферограмма – восстановленная абсолютная фаза

Fig. 4. The phase noise suppression and the unwrapping of the interferogram: a) smoothed interferogram; b) unwrapped interferogram, or the restored absolute phase

Абсолютная фаза интерференционного сигнала связана с формой рельефа поверхности с точностью до постоянного сдвига, коэффициента вертикального масштаба (высоты неоднозначности, отнесенной к интервалу однозначности фазы 2π) и де-

терминированного преобразования, исправляющего искажения геометрии бокового обзора РСА. Процедура преобразования абсолютной интерферометрической фазы в карту высот называется геокодированием интерферограммы («InSAR geocoding» [52]) или преобразованием фазы в высоты или смещения (Phase-to-Height conversion, Phase-to-Displacement conversion [53]). Для выполнения этого этапа существуют методы прямого пересчета, не требующие априорной информации о местности: метод разделения спектра [22; 54] и метод остаточной задержки [55], однако на практике используются более точные методы геокодирования по наземным опорным точкам [22; 56]. В этом случае координаты наземных опорных точек, исчисляемые в системах геодезических координат и высот, используются для уточнения параметров орбиты носителя РСА путем решения систем уравнений «дальность-доплер» для всех наборов данных, использованных в интерферометрическом синтезе [56; 57], и затем вычисления на их основе геодезических координат и высот каждого элемента интерферограммы. Искажения бокового обзора при формировании матрицы высот при этом исправляются путем переноса положения элемента в направлении дальности на величину $htg\theta_0$. Различные способы геокодирования интерферометрических данных ДЗЗ рассматриваются и сравниваются в [58].

Геопривязка абсолютной фазы заключается в выполнении преобразования абсолютных фаз и их координат в полетной системе в элементы матрицы высот [59]. Поскольку при этом должна осуществляться коррекция искажений бокового обзора, связанная с перемещением положения элемента, то на первом шаге геопривязки будет получена не регулярная сетка, а облако точек в пространстве:

$$\{m_i, n_i, \Psi_{m_i, n_i}\} \rightarrow \{B_i, L_i, H_i\}, \quad (13)$$

где B_i и L_i – широты и долготы точек, которое далее приводится к регулярному виду путем интерполяции. Реализация преобразования (13) предполагает использование наземных опорных точек $\{P_i\}$, имеющих высокоточные координаты и хорошо опознаваемые на амплитудном РЛИ. В качестве таких точек подходят пересечения дорог, мосты [59] и др. Координаты опорных точек используются для решения систем уравнений «дальность-доплер» для первого и второго КРЛИ:

$$f_{id1,2} = \frac{2 \left((\bar{P}_i - \bar{S}_{i1,2}), (\bar{V}_{Pi} - \bar{V}_{S_{i1,2}}) \right)}{\lambda |\bar{P}_{iV} - \bar{S}_{i1,2}|}; \quad (14)$$

$$R_{i1,2} = |\bar{P}_{iV} - \bar{S}_{i1,2}|,$$

где $f_{d1,2}$ – центральные доплеровские частоты элемента 1-го и 2-го КРЛИ, \vec{P}_{iV} – вектор геоцентрических координат i -й опорной точки, $\vec{S}_{i1,2}$ – вектор геоцентрических координат фазового центра антенны при съемке 1-го и 2-го КРЛИ [56]. Разрешая систему относительно $\vec{S}_{i1,2}$, становится возможным высокоточное вычисление компонентов интерферометрической базы B_{\perp} и B_{\parallel} (учитывая, что $\vec{B}_i = \vec{S}_{1i} - \vec{S}_{2i}$) и пересчет абсолютной фазы в высоту, простейшим образом реализуемый с помощью выражения:

$$h_{m,n} \approx \frac{\lambda R_1 \sin \theta_0}{4\pi B_{\perp m,n}} \Psi_{m,n}. \quad (15)$$

Таким образом, интерферометрическая обработка радиолокационных данных является сложным многоэтапным процессом, целью которого является корректное восстановление абсолютной фазы, заключающееся в минимизации ошибок и разрешении неоднозначностей, вносимых при радиолокационной съемке. Абсолютная фаза, в свою очередь, позволяет сформировать карту рельефа зондируемой поверхности.

Источники ошибок абсолютной фазы

Различные авторы и разработчики систем предлагают разные подходы к учету и классификации источников ошибок. Так, предлагается концепция «бюджета ошибки», в которой отражены различные составляющие ошибки измерения высоты [46]. Выделяются внутренние (присущие системе) ошибки измерения высоты (intrinsic height errors), связанные с неточностью измерения параметров интерферометрической системы, и позиционные ошибки, связанные с неточностью геопривязки. Там же предлагается и альтернативная классификация, отталкивающаяся от способов борьбы с источниками ошибок, где выделяются:

- случайные ошибки – шумы интерферометрической фазы, которые могут быть снижены путем фильтрации или усреднения, но не могут быть исправлены с помощью наземных опорных точек;

- геометрические искажения (дисторсии), к которым отнесены ошибки позиционирования КА по высоте и углу крена, исправляемые двумя опорными точками, ошибки измерения базы и ошибки синхронизации (атмосферные задержки), исправляемые тремя опорными точками;

- ошибки позиционирования, к которым отнесены ошибки позиционирования КА вдоль азимута, такие ошибки исправляются тремя опорными точками.

Похожим образом систематизированы в рамках иерархической схемы различные составляющие ошибки, связанные с неточностью измерения орбитальных параметров, и их влияние на величину вертикальной точности (схема построена в рамках требований к бортовой инерциальной навигационной системе AODA PCA-интерферометра SIR-C/X в миссии SRTM) [21].

Другой подход к оцениванию влияния различных источников ошибок используется в [17; 47], где вместо собственно ошибок рассматриваются и классифицируются источники декорреляции интерферометрических данных в рамках модели парциальных коэффициентов когерентности, при этом коэффициент когерентности интерферограммы вычисляется путем произведения парциальных коэффициентов, с.к.о. ошибки измерения фазы и высоты определяются следующим образом [18; 46]:

$$\sigma_{\Delta\varphi} = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arccos \rho + \arcsin^2 \rho - \frac{\text{Li}_2(\rho^2)}{2} \approx \frac{1-\rho^2}{2\rho^2}, \quad (16)$$

$$\sigma_h = \frac{\lambda R_0 \text{tg} \theta_0}{4\pi B} \sigma_{\Delta\varphi}, \quad (17)$$

где $\text{Li}_2(\cdot)$ – дилогарифм Эйлера. Цебкер выделяет 4 таких источника: временную, пространственную и тепловую декорреляции и декорреляцию, вызванную изменением угла визирования цели во время синтеза апертуры (rotation-induced decorrelation), а также предлагает модели расчета этих величин [17]. Более полная классификация приведена у Ханссена, где выделено и подробно проанализировано 6 источников декорреляций:

- геометрическая декорреляция, вызванная различием углов визирования в вертикальной плоскости;
- доплеровская декорреляция, вызванная различием углов визирования в плоскости апертуры и цели;
- объемная декорреляция;
- шумовая декорреляция;
- временная декорреляция;
- декорреляция, возникающая при обработке данных (при взаимопривязке РЛИ) [47].

При этом в классификациях не упоминаются явным образом, но отмечаются отдельно ошибки разрешения фазовой неоднозначности, которые, как отмечается, существенно ухудшают точность получаемого результата [22; 47; 60]. Борьба с такими ошибками подразумевает использование априорной информации о форме рельефа и совершенствование методов развертывания интерферометрической фазы и в рамках данной статьи не рассматривается (подробно эти вопросы рассматриваются в упомянутых ранее работах [39; 48; 51; 61]).

Оценивание точности восстановления абсолютной фазы на различных этапах интерферометрической обработки

Актуальность задачи оценивания точности высотных данных, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных ДЗЗ, стала очевидна с первых лет использования данной технологии. Оценка точности РСА-интерферометра Грэхэма проводилась путем многократных наблюдений 36 хорошо опознаваемых контрольных точек и последующего вычисления с.к.о. интерферометрических фаз, полученных по этим наблюдениям. Полученное значение в 0,2 мрад (при длине волны зондирующего сигнала 3 см) рассматривалось как достаточное для составления топографических карт масштаба 1:250 000. Голдштейн и Цербкер для авиаинтерферометра CV990 оценивали погрешности измерений высоты путем сравнения с картографическими данными только для пяти точек интерферограммы (фазовая неоднозначность разрешалась вручную), не делая подробных обобщающих выводов о точности [12].

По мере накопления экспериментальных данных космической РСА-интерферометрии во второй половине 1980-х – 1-й половине 1990-х. гг. (SEASAT, SIR-B, Алмаз-1, ERS-1/2) вопросам оценки точности путем сравнения с эталонными высотными данными стало уделяться еще больше внимания. В качестве основного численного критерия оценки в зарубежных работах точности высот рельефов традиционно используется среднеквадратическая ошибка (root mean square error, RMSE, [62]):

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_i (h_i - h_{i0})^2}{N}}, \quad (18)$$

где h_i – измеренные значения высот в контрольных точках, где h_{i0} – эталонные значения высот, N – количество контрольных точек. Отмечается, что в ряде случаев такая оценка может давать искаженные результаты и предлагается отдельно учитывать матожидание u_h разностей $(h_i - h_{i0})$ и их среднеквадратическое отклонение σ_h в виде [62]:

$$Acc = u_h \pm \sigma_h, \quad (19)$$

где

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_i ((h_i - h_{i0}) - u_h)^2}{N}}. \quad (20)$$

В работах 1990-х гг. и более поздних оба способа используются в равной мере. Также в публикациях американских (как правило) авторов используются критерий линейной ошибки LE90 (linear error, 90 %-interval) и LE95, принятые американскими

стандартами NMAS и FGDC, и при условии гауссового распределения ошибок и нулевого матожидания совпадающие с величиной с.к.о. с точностью до коэффициента [63]. Еще одним дополнительным к приведенным выше и широко применяемым способом «более тонкой» оценки вертикальной точности при наличии большого числа контрольных точек является построение и анализ гистограмм разностей ($h_i - h_{i0}$).

Значительное количество работ, посвященных оценке точности ЦМР, получаемых интерферометрическими РСА, появилось в 2000-х гг., что связано, с одной стороны, с успешным выполнением миссии SRTM в феврале 2000 г., а с другой – с прекращением практики искусственного загробления навигационных сигналов системы GPS в мае 2000 г. Последнее сделало доступным новые способы получения эталонных высот – стационарные и кинематические (GPS-трекинг) навигационные измерения.

Важной вехой в исследованиях о точности интерферометрического метода в целом стал вышедший в 2005 г. отчет о проверке (валидации) точности высотных данных, полученных миссией SRTM [23]. Проверка производилась с использованием кинематических GPS-измерений 86 тыс. наземных контрольных точек и других эталонных данных. Результаты были представлены в виде, аналогичном (19), но с использованием LE90 вместо с.к.о., и гистограмм распределения ошибки и вычислялись в пределах отдельных континентов. Исследовались «абсолютная» (в пределах континента в целом) и «относительная» (в пределах градусного листа) ошибки, а также плановая ошибка (Absolute geolocation error). При ожидавшихся значениях абсолютной и относительной ошибок измерения высот (LE90) в 16 м и 10 м соответственно, были получены значения от 5,6 до 9,0 м для абсолютной ошибки и от 4,7 м до 9,8 м для относительной, что оказалось лучше ожидаемых значений [21; 23] и подтвердило эффективность интерферометрического метода оценки высот рельефа.

Что касается других работ по оцениванию точности данных SRTM, наукометрическая база данных SCOPUS по запросу «*TITLE (((shuttle AND radar AND mission) OR srtm) AND (accuracy OR validation))*» выявляет 81 работу среди всех индексированных публикаций за период с 2000 по 1-ю половину 2020 гг., среди этих работ стоит выделить особо следующие:

1. Статью Charles G. Brown, Jr., Kamal Sarabandi, Leland E. Pierce «Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data» ([64], 2005 г.), в которой описывается технология оценки точности с использованием уголковых отражателей и активных калибраторов, установленных во время съемки. Экспе-

римент проводился на территории Юго-Восточного Мичигана (США). В качестве эталонной использовалась ЦМР USGS масштаба 1:24 000 с дополнительной GPS-калибровкой, позволившей получить вертикальную точность порядка 0,7 м. В итоге было получено расхождение (по критерию среднеквадратичного отклонения) между SRTM и эталонной ЦМР в 2,6 м (при систематической ошибке в 0,9 м), при этом в статье указывается, что при более точном совмещении моделей можно достичь 2,0 м, при этом оба значения в несколько раз лучше указанного в спецификации (10 м).

2. Статью InSu Lee, Hsing-Chung Chang, Linlin Ge «GPS campaigns for validation of InSAR derived DEMs» ([65], 2005 г.), в которой описана технология оценки вертикальной точности ЦМР ERS и SRTM с использованием GPS-аппаратуры в режиме кинематики реального времени (RTK GPS), позволяющей регистрировать пространственные траектории перемещения приемника (треки) с погрешностью позиционирования не хуже нескольких десятков сантиметров. Исследование проводилось в местности Аппин в Австралии. Сравнения значений высот полученных треков с высотами матриц исследуемых ЦМР по критерию с.к.о. (RMSE) дали результат в 2,16 м для ЦМР SRTM и 20.10 м для ЦМР ERS-Tandem.

3. Статью P.A.M. Berry, J.D. Garlick, R.G. Smith «Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry» ([66], 2007 г.), где описано оценивание точности SRTM в глобальном масштабе с использованием данных спутниковой высотометрии Ку-диапазона. По результатам сравнения SRTM и 54 миллионов отметок высот (с шагом в 350–390 м), полученных альтиметрами KA ERS-1 и ENVISAT были получены числовые характеристики точности измерения высот (средние разности и средние квадратичные отклонения) в границах отдельных континентов. С.к.о. расхождений составило от 11,5 м для Австралии до 18,5 м для Южной Африки, причем для последней также наибольшей оказалась и средняя разность (12,2 м против 1,1 м для Австралии). Высокие расхождения результатов измерений для Южной Африки увязаны с преобладанием высокогорного рельефа и с большой площадью и густотой лесных массивов на этом континенте: отдельно проведенный анализ расхождений для областей лесной растительности показал среднее расхождение более чем в 20 м. При этом следует отметить, что вопрос о точности самих высотометрических данных в статье хоть и затрагивается, но конкретных значений не приводится.

4. Статья G. Sun, K.J. Ranson, V.I. Kharuk, K. Kovacs «Validation of surface height from shuttle radar topography

mission using shuttle laser altimeter» ([67], 2007 г.), где в отличие от предыдущей работы в качестве эталонных используются высоты, полученные с использованием лазерной космической съемки (миссия SLA-02, 1997 г.). Отмечается, что точность измерения высоты при лазерном способе сканирования зависит от уклона рельефа 0,2 м (при отсутствии уклона) до 6 м (при уклоне в 40°). В ходе анализа точности SRTM были построены корреляционные поля (SLA/SRTM высоты) получены средние разности и с.к.о. (RMSE) для лесной поверхности, открытой местности и общие. Получено с.к.о. высот в 8,2 м (общая), при это показано, что для лесной и открытой местности с.к.о. отличаются незначительно (7,4 и 6,5 м, соответственно), однако для лесной поверхности значительно выше среднее расхождение обоих способов измерения (18,2 против 8,7 м).

5. Из относительно недавних работ, посвященных оценке точности и калибровке SRTM, следует упомянуть статью Marc Simard, Maxim Neumann, Sean Buckley «Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States» ([68], 2016 г.), где кратко описывается процесс коррекции SRTM с помощью данных спутниковой лазерной высотометрии ICESat/GLAS (1,5 миллиарда отметок высот, полученных в 2003–2009 гг.). Ожидается, что обновленная версия SRTM (NASADEM) будет иметь с.к.о. высот около 2,3 м при систематической ошибке в 10 см, однако к 2020 г. NASADEM по-прежнему не выпущена.

Также большое количество работ посвящено оценке точности SRTM и других интерферометрических моделей рельефа (ERS-1/2, TanDEM-X, GAOFEN-3 INSAR DEM и др.) для конкретных регионов в разных частях земного шара (SCOPUS по запросу «InSAR» и «Accuracy» выявляет 39 публикаций за период с 1997 по 2019 г. по названию и 380 – по названию и ключевым словам), что свидетельствует об актуальности тематики. Таким образом, оценивание точности цифровых моделей рельефа, получаемых радиолокационной интерферометрической съемкой, производилось, как правило, путем сравнения с эталонной цифровой моделью рельефа, представленной в форме матрицы высот или набора контрольных точек, а основным критерием точности является с.к.о. измеренных и эталонных высот (или связанные с ним оценки – RMSE, LE90) в узлах матрицы или контрольных точках. Источниками эталонных высот являются, как правило, глобальные цифровые модели рельефа, результаты GPS-измерений, отметки нормальных высот цифровых топографических карт (с преобразованием нормальных высот в геодезические). При этом практически во всех ра-

ботах рассматривается и обсуждается точность интерферометрического метода построения ЦМР в целом («an end-to-end InSAR DEM validation» [52]), но почти не затрагиваются вопросы, связанные с эффективностью применения конкретных алгоритмов интерферометрической обработки, при этом существенное влияние методов обработки на качество получаемого результата отмечается в обзорных работах и монографиях [39; 47]. В тех же работах, где эффективность отдельных алгоритмов все же исследуется, используются либо завершение цепочки обработки [38–39], либо имитационное моделирование [43; 69], либо сравнение результатов по косвенным признакам [61; 70]. Таким образом, представляется актуальной задача разработки такой методики оценивания точности результата интерферометрической обработки, при использовании которой был бы возможен автоматический перебор комбинаций параметров исследуемых алгоритмов и автоматический перебор самих используемых алгоритмов.

Смолл и Ньюэш предлагают 3 различных подхода к оценке точности высот, получаемых при PCA-интерферометрии:

- компенсация фазового уклона (выравнивание) с использованием синтетической фазы, построенной по эталонной ЦМР (DEM Flattening using synthetic interferogram);
- обратное геокодирование (backward geocoding), заключающееся в преобразовании эталонной ЦМР в полетную с.к. и сравнение абсолютных фаз;
- прямое геокодирование (forward geocoding) абсолютной фазы в геодезическую с.к. и сравнение высот [52].

Сами Смолл и Ньюэш отдают предпочтение последнему варианту как обеспечивающему полную сквозную проверку технологии построения ЦМР с использованием PCA-интерферометрии («a true end-to-end validation of the InSAR height model generation process»), однако, очевидно, такой подход осложняет исследование эффективности конкретных алгоритмов, реализующих отдельные этапы обработки и делает невозможной автоматизацию перебора параметров алгоритмов, поскольку при каждом исследуемом наборе параметров потребуются производить вручную контролируемое геокодирование. Первые же два подхода дальнейшего развития не получили, но, как было показано автором в докладах на конференциях «Радиолокация, навигация, связь – RLNC*2016» (г. Воронеж, 19–21 апреля 2016 г. [71]), 16-й международной конференции по численному анализу и прикладной математике – «ICNAAM-2018» (Греция, г. Родос, 13–18 сентября 2018 г. [72]), «Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-2018» (г. Новосибирск, 2–6 ок-

тября 2018 г., [73]), «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – КРЫМИКО-2019» (г. Севастополь, 8–14 сентября 2019 г. [74]) и др., использование приемов, основанных на идее обратного геокодирования (обратное преобразование эталонных высот, формирование эталонов абсолютных фаз и высот в бортовой системе координат носителя, процедура пространственного совмещения эталонных и измеренных данных), позволяет наиболее эффективным образом оценивать точность результатов работы алгоритмов интерферометрической обработки (алгоритмов некогерентного накопления, подавления фазового шума, развертывания фазы) при различных параметрах и сочетаниях параметров, поскольку в этом случае для получения результата не требуется завершения всей цепочки интерферометрической обработки. Получаемые при таком подходе функции зависимости ошибки (в смысле с.к.о. измеренных и эталонных фаз и высот) позволяют выявлять оптимальные значения и сочетания значений параметров алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ, получаемых различными съёмочными системами и в различных режимах съёмки.

Заключение

Проведенный обзор работ, посвященных тенденциям развития современных радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли, показал, что среди них важное место занимают методы космической радиолокационной интерферометрии, которые широко применяются используются для решения научных и практических задач ДЗЗ, среди которых основными являются задачи построения цифровых моделей рельефа земной поверхности и мониторинг подвижек рельефа. Сложность и многоэтапность интерферометрической обработки и многообразие съёмочных систем и режимов их работы делают актуальной задачи экспериментального оценивания точности результата интерферометрической обработки при различных условиях и поиска оптимальных (с точки зрения точности получаемого результата) алгоритмов для реализации отдельных этапов. Показано, что существующие и применяемые экспериментальные методы оценки точности результатов интерферометрической обработки реальных съёмочных данных используют сквозную проверку результата, при которой анализ эффективности работы алгоритмов некогерентного накопления, подавления фазового шума и развертывания фазы с перебором параметров и настроек существенно затруднен. Предложен способ оценивания точности, основанный на обратном геокодировании эталонных высотных данных.

Список литературы

1. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons; 2001.
2. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar observations of Mars. *Science*. 1963;141(3586):1171–1172. DOI: 10.1126/science.141.3586.1171-a.
3. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury. *Science*. 1963;142(3590):381–382. DOI: 10.1126/science.142.3590.381.
4. Goldstein R. M. Radar observations of Jupiter. *Science*. 1964;144(3620):842–843. DOI: 10.1126/science.144.3620.842.
5. Goldstein R. M. Radar Investigations of the Planets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1964;12(7):865–872. DOI: 10.1109/TAP.1964.1138339.
6. Котельников В. А., Ржига О. Н., Александров Ю. Н., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Шаховской А. М., Францессон А. В. Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе. В: Котельникова В. А. (ред.) *Проблемы современной радиотехники и электроники*. М.: Наука; 1980. С. 246–277. Режим доступа: <https://docplayer.ru/26396342-Razvitie-radiolokacionnyh-issledovaniy-planet-v-sovetskom-soyuze-vvedenie.html>
7. Александров Ю. Н., Вышлов А. С., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Игнатов С. П., Каевицер В. И., Котельников В. А., Крымов А. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Тагаевский А. Т., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г. *Доклады АН СССР*. 1980;255(6):1334–1338.
8. Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиointерферометре с большой базой. *Известия вузов. Радиофизика*. 1965;8(4):651–654.
9. Graham L. C. Synthetic interferometric radar for topographic map-ping. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(6):763–768. DOI: 10.1109/PROC.1974.9516.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*. 1988;9(5):857–872. DOI: 10.1080/01431168808954901.
11. Li F. K., Goldstein R. M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990;28(1):88–97. DOI: 10.1109/36.45749.
12. Zebker H.A., Goldstein R.M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91(B5):4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993.
13. Goldstein, R.M., Barnett, T.P., Zebker, H.A. Remote sensing of ocean currents. *Science*. 1989;246(4935):1282–1285. DOI: 10.1126/science.246.4935.1282.
14. Shemer L., Kit E. Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current

and a monochromatic wave. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(C12):22063–22073. DOI: 10.1029/91JC01874.

15. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1989;94(B7):9183–9191. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.

16. Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. 1988;23(4):713–720. DOI: 10.1029/RS023i004p00713.

17. Zebker H.A., Villasenor H.A. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(5):950–959. DOI: 10.1109/36.175330.

18. Bamler R., Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998;14(4):r1–r54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.

19. Агапов С. В. *Фотограмметрия сканерных снимков*. М.: Картеоцентр-Геодезиздат; 1996.

20. Тюфлин Ю. С. Преобразование космических радиолокационных изображений к снимкам центрального проектирования. *Геодезия и картография*. 1995;(12):24–28.

21. Duren R., Wong E., Breckenridge B., Shaffer S., Duncan C., Tubbs E. F., Salomon P. M. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. *Proceedings of SPIE*. 1998;3365:51–60. DOI: 10.1117/12.317529.

22. Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrigues E., Goldstein R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000;88(3):333–382. DOI: 10.1109/5.838084.

23. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Technical report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California; 2005.

24. Баранов Ю. Б., Кантемиров Ю. И., Киселевский Е. И., Болсуновский М. А. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR. *Геомастика*. 2008;(1):37–45. Режим доступа: https://sovzond.ru/upload/iblock/24e/2008_01_006.pdf

25. Горячкин О. В., Дмитренко В. И., Харитонов А. А. Экспериментальные результаты многопроходной радиолокационной интерферометрической съемки, полученные в рамках акции «Самара сквозь облака». В: *Физика и технические приложения волновых процессов: материалы 9-й Междунар. науч. конф., Челябинск, 13–17 сент. 2010 г.* Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та; 2010. С. 173–174.

26. Евтюшкин А. В., Филатов А. В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом SAR-интерферометрии по данным ENVISAT/ASAR и ALOS/PALSAR. *Современные проблемы дистанционного зондирования Зем-*

ли из космоса. 2009;6(2):46–53. Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009%2C2/46-53.pdf

27. Василейский А. С., Михайлов С. И., Черноморец С. С. Методология мониторинга потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру на участке Туапсе-Адлер с использованием данных спутниковой съемки. В: *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: 12-я Всерос. открытая конф., Москва, 2014*. Режим доступа: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/7584850/>

28. Sentinel 1 Toolbox. *STEP – Science Toolbox exploitation platform*. European Space Agency, ESA. Available at: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>

29. Cloude S., Papathanassiou K. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998;36(5):1551–1565. DOI: 10.1109/36.718859.

30. Kim Y., Zyl J. V. Overview of Polarimetric Interferometry. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*. 2000;(3):231–236. DOI: 10.1109/AERO.2000.879850.

31. Zhang Q., Yeo T. S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1818–1828. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831863.

32. Ksendzук A. V., Volosyuk V. K. Multi-base InSAR with enhanced signal processing. In: *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 9–12 Sep., 2003*. 2003. P. 405–408. DOI: 10.1109/ICATT.2003.1239243.

33. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(1):8–20. DOI: 10.1109/36.898661.

34. Захаров А. И. *Методы дистанционного зондирования Земли радарными с синтезированной апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03*. Фрязино; 2012. Режим доступа: <http://www.dslib.net/radiofizika/metody-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-radarami-s-sintezirovannoj-aperturoj.html>

35. Захаров А. И., Костюк Е. А., Денисов П. В., Бадак Л. А. Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и ее перспективы в рамках проекта «Кондор-ФКА». *Журнал радиоэлектроники*. 2019;(1):1684–1719. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.2.

36. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Timoshkina E. P., Khairtdinov S. A. Satellite Radar Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas and Displacements of Natural and Man-Made Objects. *Seismic Instruments*. 2018;54:515–520. DOI: 10.3103/S0747923918050092.

37. Вербa В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования*. М.: Радиотехника; 2010. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/book/143>

38. Елизаветин И. В., Ксенофонов Е. А. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического РСА. *Исследования Земли из космоса*. 1996;(1):75–90.

39. Шувалов Р. И. *Математическое моделирование фазового градиента для задачи развертки фазы в космической радиолокационной топографической интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18*. М.; 2011. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskoe-modelirovanie-fazovogo-gradienta-dlya-zadachi-razvertki-fazy-v-kosmicheskoi>

40. Филатов А. В. *Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01*. Барнаул; 2009. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/metod-obrabotki-kompleksnykh-radiolokatsionnykh-interferogramm-v-usloviyakh-vysokoi-vremenno>

41. Бабокин М. И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА. *Радиотехника*. 2009;7(7):51–58. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/6364>

42. Бабокин М. И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2009;7(10):65–72. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/6978>

43. Баскаков А. И., Хо К.-М. Анализ влияния фазовых шумов на точностные характеристики интерферометрических РСА с «жесткой» базой. *Исследование Земли из космоса*. 1998;(2):43–50.

44. Ксендзук А. В., Волосюк В. К., Зеленский А. А., Басарам М. А., Горячкин О. В., Кравченко В. Ф., Кутуза Б. Г., Лукин В. В., Топчий А. В., Яковлев В. П. *Цифровая обработка сигналов и изображений*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2007.

45. Коберниченко В. Г. *Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2016. Режим доступа: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/40664>

46. Rodrigues E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*. 1992;139(2):147–159. DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0018.

47. Hanssen R. F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers; 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.

48. *Описание модуля Photomod RADAR. Описание интерферометрического процессора*. М.: ЗАО «Пакурс»; 2007. Ч. 1–4.

49. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar ice motion interferometry. *Proceedings 3rd ERS Symp. Florence, Italy*. 1997;(2):969–972.

50. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003;41(9):2114–2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.

51. Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu, Hyongki Lee. Phase Unwrapping in InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40–58. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2873644.
52. Small D., Nuesch D. Validation of Height Models from ERS Interferometry. In: *Proceedings of the ESA FRINGE'96 Workshop, 30 September – 2 October 1996, Zurich, Switzerland*. 1996. Available at: <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/> (Accessed: 20.07.2020).
53. SARscape Technical Description. *L3HARRIS Geospatial*. Available at: https://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/ENVI/SAR_tech_documents/SARscape_Technical_Description.pdf (Accessed: 20.07.2020).
54. Madsen S. N., Zebker H. A., Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993;31(1):246–256. DOI: 10.1109/36.210464.
55. Madsen S. N. On absolute phases determination techniques in SAR interferometry. *Proceedings of SPIE, Orlando, FL, 19–21 Apr. 1995*, 1995;2487:393–401. DOI: 10.1117/12.210860.
56. Holecz I. F., Moreira J. H., Pasquali P., Voigt S., Meier E., Nuesch D. Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development, Singapore, 3–8 Aug. 1997*. P. 1929–1931. DOI: 10.1109/IGARSS.1997.609148.
57. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR Image Registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006;44(10):2861–2870. DOI: 10.1109/TGRS.2006.875787.
58. Small D., Pasquali P., Fuglistaler S. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. In: *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, USA, 31 May 1996*. P. 342–344. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516334.
59. Small D., Werner C., Nuesch D. Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models. *EARSEL Adv. Remote Sens.* 1995;(4):26–39.
60. Richards M. A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(9):5–29. DOI: 10.1109/MAES.2007.4350281.
61. Захарова Л. Н. Методы радиолокационной интерферометрии в исследовании характеристик земных покровов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Фрязино; 2011. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/metody-radiolokatsionnoi-interferometrii-v-issledovanii-kharakteristik-zemnykh-pokrovov>
62. Zhilin Li. On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *Photogrammetric Record*. 1988;12(72):873–877. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1988.tb00636.x.

63. Титаров П. С. Характеристики точности координат точек местности – СЕ и LE. *Геопрофи*. 2010;(1):52–53. Режим доступа: http://www.geoprofi.ru/education/Article_4543_14.aspx

64. Brown Jr. C. G., Sarabandi K., Pierce L. E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005;43(8):1707–1715. DOI: 10.1109/TGRS.2005.851789.

65. Lee I. S., Chang H.-C., Ge L. GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems*. 2005;4(1-2):82–87. DOI:10.5081/jgps.4.1.82.

66. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*. 2007;106(1):17–27. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.011.

67. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*. 2003;88(4):401–411. DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.

68. Simard M., Neumann M., Buckley S. Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10–15 July 2016*. P. 3227–3229. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729835.

69. Детков А. Н., Объедков В. А. Фильтрация фазового шума в комплексной вейвлет-области в PCA с синтезированной интерферометрической базой. *Труды Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского*. 2007;79(2):74–76.

70. Fabregas C. SAR Interferometric phase denoising. A new approach based on wavelet transform. *Proceedings of SPIE*. 2000;4173:199–210. DOI: 10.1117/12.410656.

71. Сосновский А. В., Коберниченко В. Г. Об оценивании точности цифровых моделей рельефа, получаемых интерферометрическими радиолокаторами с синтезированной апертурой. В: *Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2016): материалы 22-й Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 19–21 апреля 2016 г.* Воронеж: НПО «САКВОЕЕ»; 2016. Т. 3. С. 1074–1081. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26760231>

72. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Accuracy estimation for radar interferometric remote sensing of the Earth data. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2116(1):390008. DOI: 10.1063/1.5114403.

73. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing. In: *14th International Scientific – Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 434–438. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545481.

74. Sosnovsky A., Kobemichenko V. Experimental estimation of phase noise filters efficiency for InSAR processing. *ITM Web of Conferences* 2019;30:15010. DOI: 10.1051/itmconf/20193015010.

References

1. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons; 2001.
2. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar observations of Mars. *Science*. 1963;141(3586):1171–1172. DOI: 10.1126/science.141.3586.1171-a.
3. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury. *Science*. 1963;142(3590):381–382. DOI: 10.1126/science.142.3590.381.
4. Goldstein R. M. Radar observations of Jupiter. *Science*. 1964;144(3620):842–843. DOI: 10.1126/science.144.3620.842.
5. Goldstein R. M. Radar Investigations of the Planets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1964;12(7):865–872. DOI: 10.1109/TAP.1964.1138339.
6. Kote'nikov V. A., Rzhiga O. N., Aleksandrov Yu. N., Dubrovin V. M., Morozov V. A., Petrov G. M., Shakhovskoi A. M., Frantsesson A. V. Development of radar research of planets in the Soviet Union. In: Kotelnikov V. A. (ed.) *Problems of modern radio engineering and electronics*. Moscow: Nauka; 1980, pp. 246–277. (In Russ.) Available at: <https://docplayer.ru/26396342-Razvitie-radiolokacionnyh-issledovaniy-planet-v-sovetskom-soyuze-vvedenie.html>
7. Aleksandrov Yu. N., Vyshlov A. S., Dubrovin V. M., Zaitsev A. L., Ignatov S. P., Kaevitser V. I., Kotel'nikov V. A., Krymov A. A., Petrov G. M., Rzhiga O. N., Tagaevskii A. T., Khasyanov A. F., Shakhovskoi A. M. Radar observations of Mars, Venus and mercury at a 39 cm wavelength in 1980. *Doklady AN SSS*. 1980;255(6):1334–1338. (In Russ.)
8. Matveenko L. I., Kardashev N. S., Sholomitskii G. B. About a long-baseline radio interferometer. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 1965;8(4):651–654. (In Russ.)
9. Graham L. C. Synthetic interferometric radar for topographic map-ping. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(6):763–768. DOI: 10.1109/PROC.1974.9516.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*. 1988;9(5):857–872. DOI: 10.1080/01431168808954901.
11. Li F. K., Goldstein R. M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990;28(1):88–97. DOI: 10.1109/36.45749.
12. Zebker H.A., Goldstein R.M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91(B5):4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993.

13. Goldstein, R.M., Barnett, T.P., Zebker, H.A. Remote sensing of ocean currents. *Science*. 1989;246(4935):1282–1285. DOI: 10.1126/science.246.4935.1282.
14. Shemer L., Kit E. Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current and a monochromatic wave. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(C12):22063–22073. DOI: 10.1029/91JC01874.
15. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1989;94(B7):9183–9191. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.
16. Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. 1988;23(4):713–720. DOI: 10.1029/RS023i004p00713.
17. Zebker H.A., Villasenor H.A. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(5):950–959. DOI: 10.1109/36.175330.
18. Bamler R., Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998;14(4):r1–r54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
19. Agapov S. V. *Photogrammetry of scanner images*. Moscow: Kartgeotsentr-Geodezizdat; 1996. (In Russ.)
20. Tyufilin Yu. S. Converting of space radar images into the central design images. *Geodeziya i kartografiya*. 1995;(12):24–28. (In Russ.)
21. Duren R., Wong E., Breckenridge B., Shaffer S., Duncan C., Tubbs E. F., Salomon P. M. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. *Proceedings of SPIE*. 1998;3365:51–60. DOI: 10.1117/12.317529.
22. Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrigues E., Goldstein R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000;88(3):333–382. DOI: 10.1109/5.838084.
23. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Technical report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California; 2005.
24. Baranov Yu. B., Kantemirov Yu. I., Kiselevskiy E. I., Bolsunovskiy M. A. Dem generation based on the result of alos palsar data interferometry. *Geomatics*. 2008;(1):37–45. Available at: https://sovzond.ru/upload/iblock/24e/2008_01_006.pdf
25. Goryachkin O. V., Dmitrenok V. I., Kharitonova A. A. Experimental results of multi-pass InSAR survey obtained in the framework of the campaign “Samara through the clouds”. In: *Physics and technical applications of wave processes: Proceedings of the 9th International conference «Physics and technical applications of wave processes, Chelyabinsk, 13–17 Sept. 2010 r.* Chelyabinsk: Chelyabinsk State University; 2010, pp. 173–174. (In Russ.)

26. Yevtyushkin A. V., Filatov A. V. Estimation of Earth surface displacements in area of intensive oil production in Western Siberia by SAR interferometry using ENVISAT/ASAR and ALOS/PALSAR data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2009;6(2):46–53. (In Russ.) Available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009%2C2/46-53.pdf

27. Vasileisky A. S., Mikhailov S. I., Chernomorets S. S. Methodology for potentially dangerous impacts on railway infrastructure monitoring on the Tuapse-Adler section using satellite data. In: *Current problems in remote sensing of the Earth from space: Proceedings 12th Conference, Moscow, 2014*. (In Russ.) Available at: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/7584850/>

28. Sentinel 1 Toolbox. *STEP – Science Toolbox exploitation platform*. European Space Agency, ESA. Available at: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>

29. Cloude S., Papathanassiou K. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998;36(5):1551–1565. DOI: 10.1109/36.718859.

30. Kim Y., Zyl J. V. Overview of Polarimetric Interferometry. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*. 2000;(3):231–236. DOI: 10.1109/AERO.2000.879850.

31. Zhang Q., Yeo T. S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1818–1828. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831863.

32. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K. Multi-base InSAR with enhanced signal processing. In: *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 9–12 Sep., 2003*. 2003, pp. 405–408. DOI: 10.1109/ICATT.2003.1239243.

33. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(1):8–20. DOI: 10.1109/36.898661.

34. Zakharov A. I. *Methods of remote sensing of the Earth by synthetic aperture radars*. Fryazino; 2012. (In Russ.) Available at: <http://www.dslib.net/radiofizika/metody-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-radarami-sintezirovannoj-aperturoj.html>

35. Zakharov A. I., Kostiuk E. A., P Denisov. V., Badak L. A. Earth observation with spaceborne radar interferometric systems and its prospects within the framework of “Condor-FKA” project. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;(1):1684–1719. (In Russ.) DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.2.

36. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Timoshkina E. P., Khairtdinov S. A. Satellite Radar Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas and Displacements of Natural and Man-

Made Objects. *Seismic Instruments*. 2018;54:515–520. DOI: 10.3103/S0747923918050092.

37. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Space-borne Earth Surveillance Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika; 2010. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/book/143>

38. Elizavetin I. V., Ksenofontov E. A. Results of an experimental study of the possibility of precision measurement of the Earth's topography by the interference method based on a space SAR data. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1996;(1):75–90. (In Russ.)

39. Shuvalov R. I. *Mathematical modeling of the phase gradient for the problem of phase unwrapping in space radar topographic interferometry*. Moscow; 2011. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskoe-modelirovanie-fazovogo-gradienta-dlya-zadachi-razvertki-fazy-v-kosmicheskoi>

40. Filatov A. V. *Method for processing complex radar interferograms in conditions of high temporal decorrelation*. Barnaul; 2009. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/metod-obrabotki-kompleksnykh-radiolokatsionnykh-interferogramm-v-usloviyakh-vysokoi-vremenno>

41. Babokin M. I. Algorithms for Relative Relief Evaluation in Multiposition SAR Systems. *Radioengineering*. 2009;7(7):51–58. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/6364>

42. Babokin M. I. Measurement accuracy of earth surface relative relief in multiposition SAR systems *Radioengineering*. 2009;7(10):65–72. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/6978>

43. Baskakov A. I., Kho K.-M. Analysis of phase noise influence on the accuracy of cross-track InSAR characteristics. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1998;(2):43–50. (In Russ.)

44. Ksendzук A. V., Volosyuk V. K., Zelensky A. A., Basaram M. A., Goryachkin O. V., Kravchenko V. F., Kutuza B. G., Lukin V. V., Totskii A. V., Yakovlev V. P. *Digital signal and image processing in radio physical applications*. Moscow: FIZMATLIT; 2007. (In Russ.)

45. Kobernichenko V. G. *Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth*. Ekaterinburg: Ural University; 2016. (In Russ.) Available at: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/40664>

46. Rodrigues E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*. 1992;139(2):147–159. DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0018.

47. Hanssen R. F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers; 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.

48. *Photomod RADAR module description. InSAR processor*. Moscow: Rakurs; 2007. Part 1–4. (In Russ.)

49. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar ice motion interferometry. *Proceedings 3rd ERS Symp. Florence, Italy*. 1997;(2):969–972.

50. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003;41(9):2114–2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.
51. Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu, Hyongki Lee. Phase Unwrapping in InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40–58. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2873644.
52. Small D., Nuesch D. Validation of Height Models from ERS Interferometry. In: *Proceedings of the ESA FRINGE'96 Workshop, 30 September – 2 October 1996, Zurich, Switzerland*. 1996. Available at: <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/> (Accessed: 20.07.2020).
53. SARscape Technical Description. *L3HARRIS Geospatial*. Available at: https://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/ENVI/SAR_tech_documents/SARscape_Technical_Description.pdf (Accessed: 20.07.2020).
54. Madsen S. N., Zebker H. A., Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993;31(1):246–256. DOI: 10.1109/36.210464.
55. Madsen S. N. On absolute phases determination techniques in SAR interferometry. *Proceedings of SPIE*, Orlando, FL, Apr. 19–21, 1995;2487:393–401. DOI: 10.1117/12.210860.
56. Holecz I. F., Moreira J. H., Pasquali P., Voigt S., Meier E., Nuesch D. Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development, Singapore, 3–8 Aug. 1997*. P. 1929–1931. DOI: 10.1109/IGARSS.1997.609148.
57. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR Image Registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006;44(10):2861–2870. DOI: 10.1109/TGRS.2006.875787.
58. Small D., Pasquali P., Fuglistaler S. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. In: *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, USA, 31 May 1996*. P. 342–344. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516334.
59. Small D., Werner C., Nuesch D. Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models. *EARSEL Adv. Remote Sens.* 1995;(4):26–39.
60. Richards M. A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(9):5–29. DOI: 10.1109/MAES.2007.4350281.
61. Zakharova L. N. *Methods of radar interferometry in the study of land cover characteristics*. Fryazino; 2011. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/metody-radiolokatsionnoi-interferometrii-v-issledovanii-kharakteristik-zemnykh-pokrovov>

62. Zhilin Li. On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *Photogrammetric Record*. 1988;12(72):873–877. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1988.tb00636.x.

63. Titarov P. S. Characteristics of Survey Points' Precision – CE and LE. *Geoprofi*. 2010;(1):52–53. (In Russ.) Available at: http://www.geoprofi.ru/education/Article_4543_14.aspx

64. Brown Jr. C. G., Sarabandi K., Pierce L. E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005;43(8):1707–1715. DOI: 10.1109/TGRS.2005.851789.

65. Lee I. S., Chang H.-C., Ge L. GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems*. 2005;4(1-2):82–87. DOI:10.5081/jgps.4.1.82.

66. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*. 2007;106(1):17–27. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.011.

67. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*. 2003;88(4):401–411. DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.

68. Simard M., Neumann M., Buckley S. Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10–15 July 2016*, pp. 3227–3229. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729835.

69. Detkov A. N., Obiedkov V. A. Filtration of a phase noise in a complex wavelet-area in a SAR with synthesized interferometric base. *Trudy Voenno-vozdushnoj inzhenernoj akademii imeni professora N.E. Zhukovskogo*. 2007;79(2):74–76. (In Russ.)

70. Fabregas C. SAR Interferometric phase denoising. A new approach based on wavelet transform. *Proceedings of SPIE*. 2000;4173:199–210. DOI: 10.1117/12.410656.

71. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An accuracy estimation of digital elevation models obtained by the method of satellite radar interferometry. In: *Radar, navigation, communication (RLNC-2016): Proceeding 22th International conference, Voronezh, 19–21 April 2016*. Voronezh: SAKVOEE; 2016. Vol. 3, pp. 1074–1081. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26760231>

72. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Accuracy estimation for radar interferometric remote sensing of the Earth data. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2116(1):390008. DOI: 10.1063/1.5114403.

73. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing. In: *14th International Scientific – Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russia,

2–6 Oct. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 434–438. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545481.

74. Sosnovsky A., Kobemichenko V. Experimental estimation of phase noise filters efficiency for InSAR processing. *ITM Web of Conferences* 2019;30:15010. DOI: 10.1051/itmconf/20193015010.

Информация об авторе

Сосновский Андрей Васильевич, ведущий инженер, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург). Специалист в области обработки данных радиоэлектронных систем дистанционного зондирования Земли.

Information about the author

Andrey V. Sosnovsky is a leading engineer and senior lecturer of the Yeltsin Ural Federal University, department of radio electronics and telecommunications (Ekaterinburg). He is a specialist in the field of signal and data processing in the radar systems of the remote sensing of the Earth.

Поступила / Received: 10.07.2020

Принята в печать / Accepted: 30.07.2020